

Karl-Friedrich Berger,
Sandra Kiefer (Hrsg.)

JAHRBUCH 2022

Dichten. Kleben. Polymer.

Per Simulation Bauteilkosten senken

Entwicklung, Visualisierung & Optimierung virtueller Konzepte zur Beschleunigung der Dichtungs- und Membranentwicklung

AUTOMOTIVE – Nicht nur die Finite-Elemente-Methode (FEM) hat in der Produktentwicklung ein wachsende Bedeutung. Fortschrittliche Simulationstechniken ermöglichen Herstellern von Komponenten für die Fahrzeugindustrie den beschleunigten Transfer virtueller Konzepte in innovative Produkte.

Der Mobilitätssektor unterliegt einem fundamentalen Wandel. Veränderte individuelle und gesellschaftliche Bedürfnisse, disruptive Innovationen durch die Digitalisierung, neu aufstrebende Mobilitätsanbieter und anspruchsvollere Regularien verändern Märkte und Geschäftsmodelle. Der Einsatz zunehmend komplexer und anspruchsvoller Technologien schreitet rasant voran und verlangt nach entsprechend agilen Methoden in der Komponenten- und Bauteilentwicklung, um mit den steigenden Anforderungen Schritt zu halten. Die Innovationszyklen in der Branche werden kürzer und erfordern eine intensivere Zusammenarbeit entlang der gesamten Lieferkette, um neue Mobilitätslösungen erfolgreich, effizient und profitabel in die Produktion überführen zu können.

Angesichts immer kürzerer Produktlebenszyklen sind agile Entwicklungsprozesse gefragt, die wesentlich auf dem Einsatz numerischer Simulationen beruhen. Insbesondere die FEM-basierte Simulation als integraler Bestandteil des Co-Engineering-Prozesses ermöglicht eine flexible und effiziente Produktentwicklung sowie die Beurteilung einer Vielzahl technischer Fragestellungen, von der Strukturmechanik über Fluidströmungen bis hin zur Vulkanisationskinetik. Die Simulation erleichtert das Verständnis komplexerer Produkte und Produktionsprozesse und hilft, potenzielle Funktions- und/oder Produktionsprobleme zu erkennen, lange bevor reale Prototypen existieren.



Von Dr. Rudolf Randler, Head of Simulation,



Raphael Kaelin, Head of Testing,



Adrian Haueter, Head of Flow and Process Simulation,
Dätwyler Group | www.datwyler.com

Vorrangiges Ziel der Nutzung virtueller Methoden bei der Entwicklung systemkritischer Elastomerbauteile ist die systematische Optimierung des Produkt- und Werkzeugdesigns. So können eine maximale Produktperformance, zuverlässige und effiziente Fertigungsprozesse sowie eine gleichbleibend hohe Produktqualität sichergestellt werden. Zudem wird der Aufwand für die Herstellung funktionaler Prototypen und für deren mechanische Erprobung unter den Bedingungen der späteren Serie deutlich reduziert. Dies bedeutet wiederum, dass innovative Produkte schneller und kostengünstiger auf dem Markt eingeführt werden können.

Simulation als Katalysator für Innovation

Moderne Simulationsmethoden sind die Schlüsseltechnologie für den Transfer virtueller Konzepte in neue Produkte. Die zügig voranschreitende Digitalisierung in Verbindung mit Fortschritten in der Prozessortechnologie eröffnet spannende Perspektiven für die virtuelle Entwicklung von Produkten und industriellen Prozessen. Bereits heute ist es möglich, die Funktionalität und das Leistungsvermögen von Produkten mithilfe von Simulationen vorherzusagen. Ebenso können Herstellungsprozesse virtuell ausgelegt, visualisiert und optimiert werden. All dies sind Bausteine auf dem Weg hin zu einer vollständig virtuellen Produkt- und Prozessentwicklung, die maximale Flexibilität bietet, um künftigen Herausforderungen der Produktentwicklung agil begegnen zu können.

Dank des Einsatzes fortschrittlicher Simulationsmethoden bei der Auslegung von Dichtungskomponenten ist man in der Lage, Anwendern während des Produktentwicklungsprozesses einen erheblichen Mehrwert zu bieten. Insbesondere die Zusammenarbeit in Co-Engineering-Partnerschaften ermöglicht die Entwicklung von Produktlösungen und die Implementierung von Fertigungsprozessen, die perfekt auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten sind. So erreicht man die bestmögliche Produktleistung bei gleichzeitiger Erfüllung höchster Qualitätsstandards. Dies wird nachfolgend anhand einiger der wichtigsten Aspekte bei der Simulation von Elastomer- und Thermoplastbauteilen vorgestellt.

Fortschrittliche Prüf- und Modellierungsmethoden – Grundlage für das Verständnis komplexer Materialien

Elastomerwerkstoffe zeichnen sich durch äußerst komplexe Eigenschaftsprofile aus, und sie erfordern daher ausgeklügelte Prüf- und Modellierungstechniken, um ihre Eigenschaften zu charakterisieren und in Form mathematischer Modelle zu quantifizieren. Es werden Materialmodelle benötigt, die in der Lage sind, die für die jeweilige Analyse relevanten physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe in Form mathematischer Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Während strukturmechanische Berech-

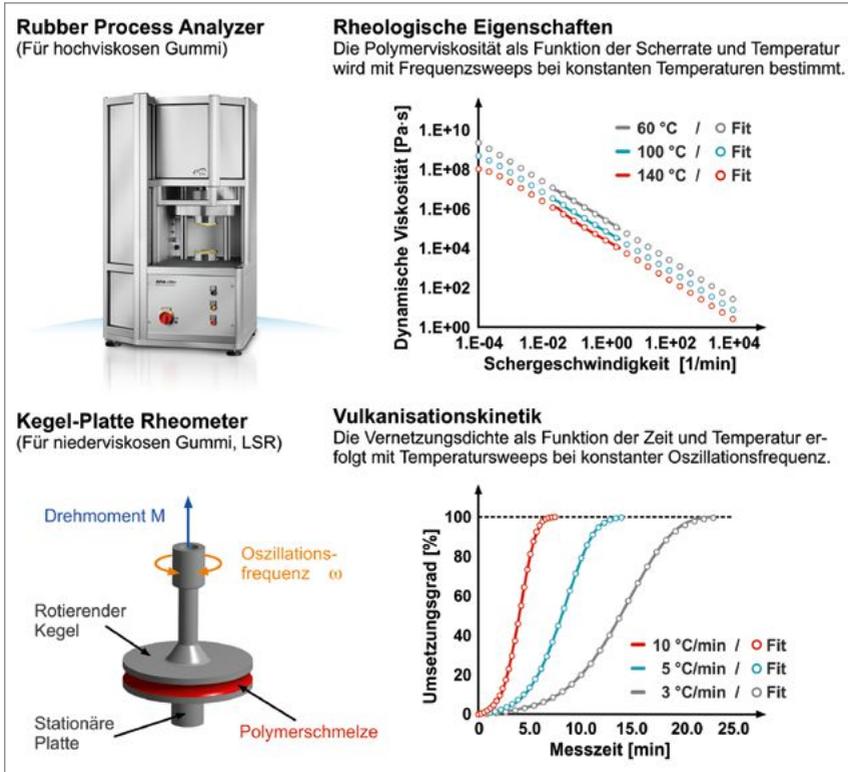


Bild 1: Das Testen und Modellieren von rheologischen Materialeigenschaften ist eine unabdingbare Voraussetzung für virtuelle Spritzgieß-Simulationen (Bild: Dätwyler)

nungen, z.B. eine mathematische Beschreibung der Spannung in Abhängigkeit von Dehnung, Zeit oder Frequenz, erfordern, verlangt die Simulation von Fertigungsprozessen nach einer Charakterisierung der Viskosität der Polymerschmelze als Funktion der Temperatur und Scherrate. Materialmodelle sind somit eine Art von mathematischer oder digitaler Repräsentation realer Werkstoffe und deren Genauigkeit bestimmt direkt die Güte, Aussagekraft und Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse.

Modernste Prüf- und Modellierungsmethoden ermöglichen nicht nur die Ermittlung materialspezifischer Eingangsparameter für die numerische Simulation, sondern schaffen auch systematische Entscheidungsgrundlagen für die gezielte Werkstoffauswahl. Eigene Weiterentwicklungen ergänzen dabei standardisierte Prüfansätze für die

Entwicklung neuer oder die Auswahl bestehender Werkstoffe, die auf die Anforderungen der jeweiligen Anwendung zugeschnitten sind.

Hier zahlt sich die frühzeitige Zusammenarbeit zwischen Anbieter und dem jeweiligen Kunden aus, da die notwendigen Prüf- und Modellierungsaktivitäten parallel zur Designentwicklung durchgeführt werden können. Die Werkstoffcharakterisierung kann entsprechend den problemspezifischen Belastungsbedingungen erfolgen, sodass sich die Werkstoffeigenschaften durch, an die Lastfälle angepasste Materialmodelle verlässlich und genau darstellen lassen. Ziel ist es, ein vollständiges virtuelles Abbild der Materialeigenschaften zu erstellen, um untersuchen zu können, wie sich Materialien während des Produktionsprozesses und im späteren Einsatz im Produkt verhalten werden.

Beispiele für Untersuchungsgebiete und Prüfmethoden sind:

Nichtlineares hyperelastisches Materialverhalten

- Erfassung qualitativ hochwertiger quasistatischer Spannungs-Dehnungs-Daten für verschiedene Verformungszustände durch optische Dehnungsmessung
- Modellierung des quasistatischen, nichtlinearen, hyperelastischen mechanischen Verhaltens von Elastomerwerkstoffen mit hochwertigen Materialmodellen und unter Verwendung maßgeschneiderter Optimierungsalgorithmen

Viskoelastisches Materialverhalten

- Messung der viskoelastischen Eigenschaften elastomerer Materialien im Frequenz- und Zeitbereich, über weite Temperaturintervalle und für verschiedene Deformationszustände
- Modellierung der Dämpfungseigenschaften und des zeitabhängigen Verhaltens mithilfe von anwendungsspezifischen Materialmodellen und unter Verwendung maßgeschneiderter Optimierungsalgorithmen

Rheologie und Vulkanisationskinetik

- Prüfung und Modellierung der rheologischen Eigenschaften und der Vulkanisationskinetik unvernetzter Elastomermischungen für Prozesssimulationen und zur Ableitung optimierter Vulkanisationsbedingungen. **Bild 1** zeigt Beispiele für solche Tests

Strukturmechanische Analyse – das Rückgrat der (virtuellen) Produktentwicklung

Die strukturmechanische Analyse untersucht die Auswirkungen äußerer Belastungen, z.B. von Kräften oder Drücken, auf physikalische Strukturen und deren Komponenten. Dabei werden Konzepte, Theorien und Methoden der Kontinuumsmechanik, der Werkstoffkunde und der angewandten Mathematik verwendet, um resultierende Verformungen, innere Kräfte, Spannungen, Auflagerreaktionen oder Beschleunigungen

zu berechnen oder die Stabilität einer Struktur zu beurteilen. Aufgrund der Komplexität der zugrundeliegenden Physik sind analytische Berechnungen meist nicht möglich, weshalb numerische Simulationsverfahren – und hier vorzugsweise die FEM – zum Einsatz kommen. Auf Grundlage der Berechnungsergebnisse lässt sich die Gebrauchstauglichkeit eines Designs schnell und effizient überprüfen, und die Funktionalität kann durch Design- und/oder Materialanpassungen bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl mechanischer Versuche systematisch optimiert werden.

Die strukturelle Analyse ist sozusagen das Rückgrat der Produktentwicklung, sowohl was das Design neuer Produkte als auch die Optimierung bestehender mechanischer Systeme anbelangt. Auch der Einfluss thermischer Belastungen und deren Auswirkungen auf die Bauteilfunktionalität kann untersucht werden. Insbesondere die Kopplung von struktureller mit thermischer Analyse ist ein gutes Beispiel für eine einfach realisierbare Multiphysik. Gerade eine solche ganzheitliche Herangehensweise über einzelne physikalische Domänen hinweg ist der Schlüssel zu einer erfolgreichen Bauteiloptimierung.

Wenn bestehende Produkte in neuen Anwendungsbereichen eingesetzt werden sollen, müssen Konstruktion und Leistungsvermögen aller Komponenten neu bewertet werden. Häufig sind solche neuen Anwendungen durch veränderte Belastungsbedingungen gekennzeichnet, etwa höhere Temperaturen, höhere Drücke oder andere Betriebsmedien. Hier gilt es dann zu klären, ob die bestehenden Produkte unter den veränderten Randbedingungen noch einwandfrei funktionieren und bis zu welchen Belastungsgrenzen ein reibungsloser Betrieb gewährleistet werden kann (**Bild 2**).

Auch Bedenken hinsichtlich der Montagefähigkeit von Dichtungselementen sind ein häufig wiederkehrendes Thema. Mithilfe struktureller Simulationen kann der Montageprozess sehr detailliert und einfach analysiert werden. Durch konstruktive Anpassungen ist es möglich, die auftretenden Verformungen, resultierenden Montagekräfte und vorherrschenden Kontaktdrücke zu optimieren. So wird sichergestellt, dass sich die Komponenten problemlos in den Montagelinien des Kunden verbauen lassen und nur zuverlässige und sichere Produkte auf den Markt gelangen.

Effizientes Prototyping

Virtuelle Prototypen sind das zentrale Element zukünftiger Produktentwicklungsprozesse: Während der Produktentwicklung ist der wiederholte und umfassende Einsatz von Prototypen zur Funktionsprüfung und Designoptimierung ein entscheidender Arbeitsschritt, der den Unterschied zwischen Erfolg und Misserfolg einer Marktein-

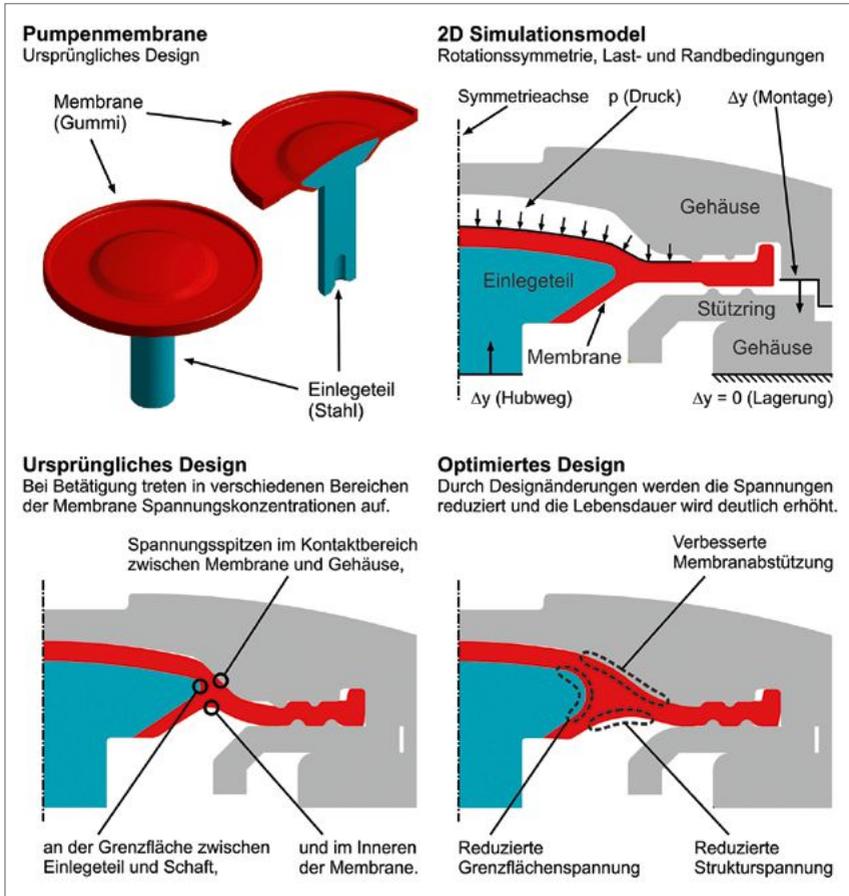


Bild 2: Strukturmechanische Designoptimierung einer Pumpenmembrane und des umgebenden Gehäuses, mit dem Ziel, die Systemleistung zu verbessern und die Lebensdauer der Membrane zu erhöhen (Bild: Dätwyler)

führung ausmachen kann. Insbesondere die Herstellung funktionaler Prototypen kann nicht nur sehr zeitintensiv, sondern auch kostspielig sein, vor allem dann, wenn sich aus den Testläufen notwendige Designänderungen ergeben, die eine Überarbeitung der Werkzeuge erfordern. Computergestützte Design- und Simulationsmethoden haben den Weg für den zunehmenden Einsatz von virtuellen Prototypen in der Produktentwicklung geebnet. Die Nutzung digitaler Zwillinge realer Produkte, die in

rechnerbasierenden Umgebungen erstellt werden, hilft bei der Verbesserung und Optimierung der Produktleistung, reduziert den Testaufwand und die Anzahl notwendiger Iterationszyklen. Dies beschleunigt den Entwicklungsprozess, erlaubt eine schnellere Markteinführung und ermöglicht deutliche Kosteneinsparungen.

Die Vorteile des Co-Engineerings liegen auf der Hand: Die Kombination aus optimierter Bauteilgeometrie und maßgeschneidertem Werkstoff ist der Schlüssel für herausragende Produktlösungen. So erreichen z.B. Dichtsysteme nur dann ihre optimale Funktionalität, wenn die Konstruktionen von Dichtelement und Einbauraum perfekt aufeinander abgestimmt sind. Erfolgreiche Co-Engineering-Projekte zeichnen sich deshalb immer durch eine möglichst frühzeitige und enge Zusammenarbeit im Entwicklungsprozess aus, wenn die Gestaltungsfreiheit des Gesamtsystems noch eine optimale Abstimmung zwischen Dichtungsbauteil und Einbauraum erlaubt. Eine solche Vorgehensweise mindert zudem das Risiko, ein Bauteil zu einem späteren Zeitpunkt nochmals anpassen oder neu konstruieren zu müssen, um es im vorhandenen Bauraum unterbringen zu können. Unabhängig von der Anwendung ist es immer sinnvoller, ein Bauteil als integralen Bestandteil eines Gesamtsystems zu entwerfen, als es später in einen bereits vorhandenen Bauraum einpassen zu müssen.

Virtuelles Spritzgießen – Optimierung der Stabilität und Effizienz von Produktionsprozessen

Spritzgussteile für Automobilanwendungen müssen höchsten Qualitätsansprüchen in Bezug auf Produkteigenschaften und Prozessverlässlichkeit genügen. Sorgfältig optimierte Produktionsprozesse können sicherstellen, dass vorgegebene Normen und Spezifikationen eingehalten werden.

Mithilfe von Simulationen können Experten den gesamten Spritzgießprozess über mehrere Zyklen hinweg untersuchen, indem sie das Spritzgießwerkzeug, das Bauteil, das Angussystem, die Temperierung und eventuell verwendete Einlegeteile in allen Details nachbilden. Realitätsnahe Prozesssimulationen umfassen dabei nicht nur die Stadien des Füllens, Verdichtens und Erstarrens bzw. Vulkanisierens, sondern auch die Bedienschritte zwischen den Zyklen, also die Zeiten, die benötigt werden, um das Werkzeug zu öffnen, das Bauteil auszuwerfen, die Formeinlegeteile erneut zu platzieren und das Werkzeug wieder zu schließen (**Bild 3**).

Bei Spritzgießprozessen definiert die Geometrie eines Bauteils die Gestalt der Kavitäten in der Gussform, und in Abhängigkeit von den Bauteilabmessungen kann das komplette Spritzgusswerkzeug konstruiert und mithilfe des virtuellen Spritzgießens

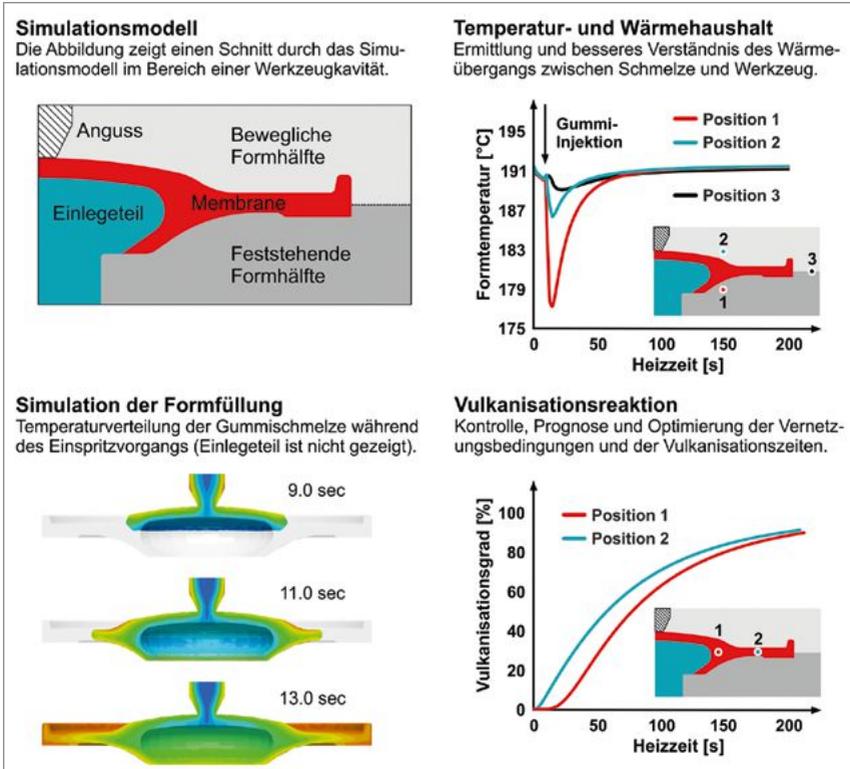


Bild 3: Analyse des Materialflusses und der Temperaturverteilung innerhalb des Werkzeugs sowie der Vulkanisationsreaktion mithilfe des virtuellen Spritzgießens am Beispiel einer Pumpenmembran (Bild: Dätwyler)

optimiert werden. Ähnlich wie in der Realität, wo vor dem Start der Teileproduktion die Werkzeuge mit mehreren Formgebungszyklen eingefahren werden, wird auch im virtuellen Spritzgießprozess das Werkzeug zunächst stabilisiert, bis die thermischen Bedingungen zwischen aufeinanderfolgenden Zyklen konsistent sind. Die Simulation ermöglicht dabei ein tieferes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen der Polymerschmelze und dem Werkzeug während der Wärmeübertragung. So kann z.B. untersucht werden, wie die Viskosität des geschmolzenen Polymers oder die Aushärtung bzw. Vulkanisation des Werkstoffs in der gefüllten Kavität von der Werkzeugtemperatur oder der Zykluszeit beeinflusst werden. Die Auslegung von Heiß- und Kaltkanalsystemen, die Position der Angusspunkte und Prozessparameter wie

Einspritzdruck, Werkzeugtemperatur und Zykluszeiten können so bestimmt werden, dass eine maximale Prozesseffizienz erzielt wird.

Im Ergebnis können Prozessprobleme, die Überarbeitungen erforderlich machen, virtuell sehr früh erkannt und korrigiert werden. Auf diese Weise kann das Design eines Werkzeugs bereits vor dessen Herstellung optimiert werden, wodurch die Zeit bis zur Markteinführung eines neuen Produkts deutlich verkürzt werden kann. Waren in der Vergangenheit bei der Entwicklung von serientauglichen Spritzgießwerkzeugen für die Fertigung komplexer Thermoplastbauteile fünf bis sechs Optimierungsschleifen keine Seltenheit, können Simulationsexperten diesen Prozess heutzutage routinemäßig auf zwei bis drei Änderungsrunden halbieren. Damit leistet das virtuelle Spritzgießen einen entscheidenden Beitrag, um die ambitionierten Kostenziele in der Produktion von Mobilitätsprodukten erreichen zu können.

Der Einsatz numerischer Simulation ermöglicht effiziente Innovation

Eine gängige Methode, die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffbauteilen zu verbessern, ist die Beimischung von Glas- oder Kohlenstofffasern zu thermoplastischen Polymeren. Beim Einspritzvorgang orientieren sich diese Fasern aufgrund der Scherbeanspruchung entlang der lokalen Fließrichtung der Polymerschmelze, was zu einer dreidimensionalen Verteilung der Faserorientierungen und damit zu lokal anisotropen Materialeigenschaften der Bauteile führt. Entsprechend der lokalen Faserorientierung werden dann im Rahmen der Prozesssimulation mit einem geeigneten mikromechanischen Modell die lokalen thermomechanischen Spannungen und Dehnungen des Spritzgussteils berechnet.

Diese Information wird zwar primär zur Werkzeugauslegung genutzt, um Schwindung und Verzug vorherzusagen, aber die Ergebnisse der Prozesssimulation können auch in ein FE-Modell übertragen werden, um sie so einer strukturmechanischen Analyse zuzuführen. Diese Kopplung von Prozess- und Struktursimulation ermöglicht sehr realitätsnahe Berechnungen und erlaubt so die Designoptimierung unter Berücksichtigung der herstellungsbedingten anisotropen Eigenschaften eines Bauteils. Dies erhöht die Genauigkeit der Analyse, wodurch Überdimensionierungen vermieden werden und der Materialverbrauch reduziert werden kann.

Fazit

In einer Branche, in der die Komplexität von Komponenten und Bauteilen immer weiter zunimmt, müssen die Methoden und Prozesse der Produktentwicklung Schritt halten. Dies wird durch die virtuelle Produktentwicklung erreicht: Mithilfe mathematischer

Modellierungs-, Simulations- und Optimierungsmethoden können herausragende Produktlösungen geschaffen werden, die bis an die Leistungsgrenzen des physikalisch Machbaren gehen. Dank leistungsfähiger Simulationsmethoden werden mehrere Ebenen der physischen Interaktion beseitigt und Prozesse vereinfacht sowie optimiert. So können Hersteller neue Bauteile schneller und kostengünstiger auf den Markt bringen, ohne dabei Kompromisse bei der Qualität eingehen zu müssen. Dank der fortschreitenden Digitalisierung, neuer Möglichkeiten wie Cloud Computing und Fortschritten in der Prozesstechnologie, wird der Einsatz virtueller Methoden in der Produktentwicklung, bei der Gestaltung von Produktionsprozessen und in der Zusammenarbeit zwischen Kunden und Zulieferern in naher Zukunft noch einmal an Fahrt aufnehmen.

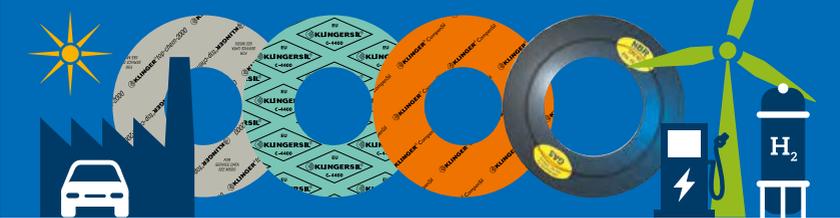
 **Zum Lösungspartner**

 **KLINGERSIL® C-4240 – Dichtung für die Trinkwasserversorgung**



ENERGIEWENDE MIT H₂-TECHNOLOGIE

KLINGER®-Dichtungen sind dabei



KLINGER GmbH
Rich.-Klinger-Straße 37
D-65510 Idstein

T +49 61 26 4016 - 0
F +49 61 26 4016 - 11
mail@klinger.de

www.klinger.de